

ГЕОЛОГО-ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ КАТАСТРОФИЧЕСКИХ ОБВАЛЬНЫХ И ОБВАЛЬНО-ОПОЛЗНЕВЫХ ПРОЦЕССОВ В КАМЧАТСКОЙ ДОЛИНЕ ГЕЙЗЕРОВ (ПО ДАННЫМ АЭРОФОТОГРАММЕТРИИ)

© 2009 г. В. Н. Двигало, И. В. Мелекесцев

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006

Поступила в редакцию 22.04.2008 г.

Рассмотрены результаты аэрофотогеодезических работ 1973–2008 гг., проведенных в районе знаменитой Камчатской Долины Гейзеров Институтом вулканологии ДВО РАН (ИВ) – 1973–1993 гг. и его преемником Институтом вулканологии и сейсмологии ДВО РАН (ИВиС) – 2007–2008 гг. совместно с кафедрой фотограмметрии Новосибирского института инженеров геодезии, аэрофотосъемки и картографии (НИИГАиК) – 1973–1985 гг. Аэрофотосъемка, выполненная ИВ после тайфуна Эльза в октябре 1981 г., позволила выявить и зафиксировать первый со времени начала наблюдений связанный с тайфуном оползень на восточном склоне Долины. Измеренная площадь оползневых отложений – 28600 м², объем – 80000 м³. Анализ материалов аэрофотосъемки 12 июля 2007 г. явился базой для объективной оценки последствий катастрофического события 3 июня 2007 г. в Долине Гейзеров, определения качественных и количественных характеристик вновь возникших форм, долгосрочного прогноза будущих опасных явлений и процессов. Сделан вывод о том, что опасные природные события и процессы, бывшие в прошлом, несомненно, станут происходить и в дальнейшем. Поэтому необходим постоянный мониторинг Долины Гейзеров с помощью высокоточных геодезических и дистанционных методов.

ВВЕДЕНИЕ

3 июня 2007 г. в знаменитой Камчатской Долине Гейзеров, отнесенной к объектам Всемирного наследия ЮНЕСКО, случилась катастрофа: с борта долины р. Гейзерная сошел крупный обвало-оползень, который вызвал кардинальные изменения природной обстановки, а также разрушения и повреждения хозяйственных объектов Кроноцкого Государственного биосферного заповедника. Последствия этой природной катастрофы были изучены сотрудниками Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН. Причем определяющую роль в получении объективных оценок качественных и количественных параметров произошедшего события, его общего геолого-геоморфологического эффекта, выявления и картирования предшествующих событий такого рода, оценке будущей опасности сыграли данные стереофотограмметрии Долины Гейзеров. Подобные данные невозможно было бы получить, если бы до катастрофы 2007 г. не выполнялись аэрофотосъемочные работы, на базе которых составлялись топопланы и крупномасштабные карты на отдельные участки Долины Гейзеров и сопредельные территории. В настоящее время подведены первые итоги исследований Долины Гейзеров, проведенных на основе данных стереофотограмметрии, сделаны соответствующие выводы и прогнозные оценки дальнейшего развития здесь опасных процессов. Все это изложено в представленной статье, в том числе, предыстория и примененная методика исследований.

ВУЛКАНО-СТРУКТУРНАЯ ПОЗИЦИЯ ДОЛИНЫ ГЕЙЗЕРОВ

Главная особенность вулcano-структурной позиции Долины Гейзеров – ее приуроченность к исключительно динамичной и интенсивно прогретой центральной части крупного кальдерного комплекса плейстоценового возраста, расположенного внутри 70–75-километровой Узонской купольно-кольцевой структуры, которая была выделена Ю.П. Масуренковым [8]. На рис. 1а показана лишь западная половина этого кальдерного комплекса [1], включающего три выраженных в рельефе кальдеры: Пра-Узон (реконструированная площадь – 170–175 км², возраст – средний плейстоцен), Узон (площадь около 80 км², ¹⁴С возраст – 39–40 тыс. лет), Гейзерная (площадь примерно 66 км², возраст позднеплейстоценовый).

Восточная половина комплекса дополняется гигантской (20–25 км в поперечнике) кальдерой Пра-Кихпиньчская, выделенной И.В. Мелекесцевым по результатам дешифрирования аэрофотоснимков и космических изображений, с вложенными в нее, близкими по размерам (5.5 × 4.5 км) кальдерами Желтая и Кихпиньчская (выделены В.Л. Леоновым [6] и И.В. Мелекесцевым). В кальдере Желтая располагается сложенный породами, сильно измененными гидротермальными процессами, потухший вулкан Желтый (1585 м), а в кальдере Кихпиньчская – вулкан Молодой Кихпиньч с действующим конусом Савича (1552.5 м), который возник ~1400 л.н. [2, 14]. Молодой Кихпиньч поса-

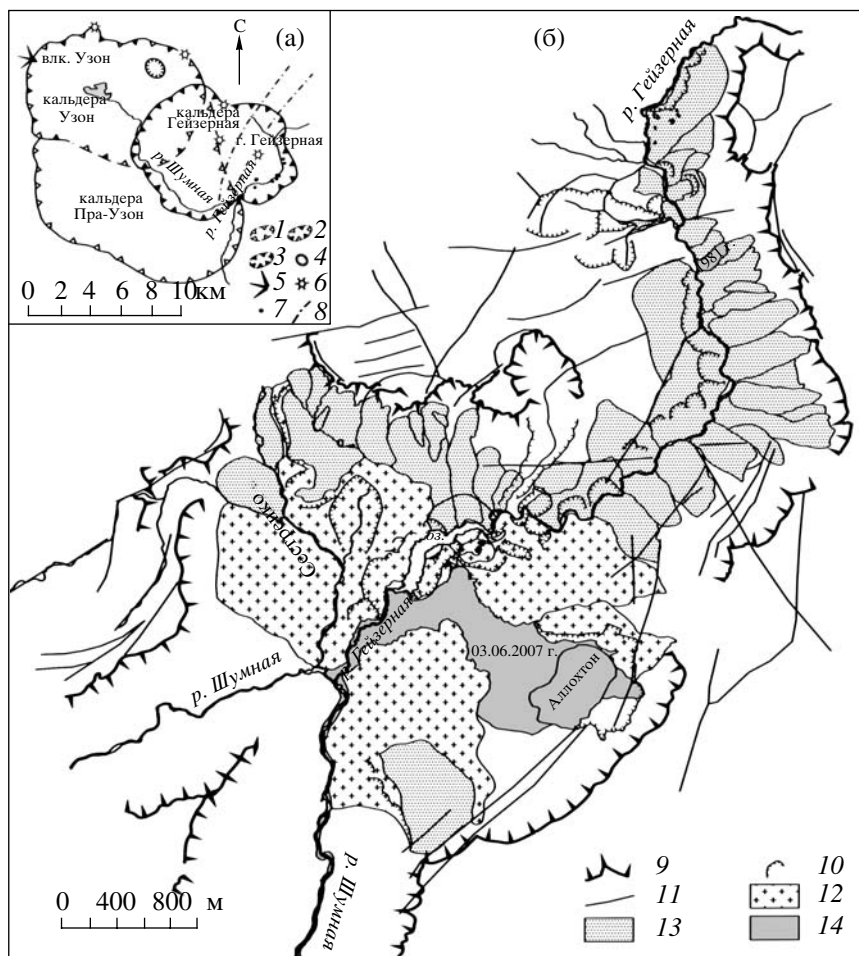


Рис. 1. Структурная позиция (а), обвальные и обвально-оползневые формы (б) района Долины Гейзеров. 1–3 – бровки уступов кальдер (1 – Пра-Узон, 2 – Узон, 3 – Геизерная); 4 – эксплозивные кратеры; 5 – стратовулканы; 6 – экструзивные куполы; 7 – гейзеры; 8 – крупнейшие разрывные нарушения, выраженные в рельефе; 9–10 – обвальные и обвально-оползневые центры (9 – вдоль бровок долин рек Геизерная и Шумная, 10 – на склонах долины р. Геизерная); 11 – выраженные в рельефе разрывные нарушения разных типов; 12 – тела аллохтонов доисторического возраста; 13 – тела обвальных и обвально-оползневых форм доисторического возраста; 14 – формы обвало-оползня 3 июня 2007 г. Контур с датой 1981 г. – оползень, связанный с тайфуном Эльза; оз. – подпрудное озеро 2007 г.

жен на вулкан Старый Кихпинич [2, 14], сложенный, как и вулкан Желтый, интенсивно измененными породами: коалинизированными и алунитизированными пемзами и лавами [3]. Кроме того, постоянная сольфатарная активность проявляется у юго-западного подножия этого вулкана, в истоках р. Геизерная.

Сплошное площадное распространение измененных пород свидетельствует о значительной тепловой мощности и вполне вероятном неглубоком залегании обширного, нагретого до высокой температуры, магматического тела или комплекса магматических тел, внедренных в породы фундамента обоих вулканов. Они же явно служат и источником теплового питания термального поля Верхнегейзерных паровых струй и Кихпиничских термальных полей (рис. 71 в [7]). По морфологии (пологий свод), обилию насаженных эруптивных

аппаратов разного типа (стратовулканы, экструзивные куполы, шлаковые конусы), площадной прогретости измененных пород, приуроченности к 20–25 километровой кальдере описываемый участок может быть отнесен к типичным внутрикальдерным резургентным поднятиям, характерным для крупных кальдер. Причем интенсивное повсеместное выделение тепла, недавнее (4800 л.н.) возникновение вулкана Молодой Кихпинич и его неоднократные извержения, практически вплоть до исторического времени, с образованием эффузивного купола Краб после 1400–1500 гг. [2, 14], наличие свежих разрывных нарушений, обвалы указывают на продолжающееся активное формирование этой структуры. На западе последняя сопрягается еще с одной предполагаемой структурой типа внутрикальдерного резургентного поднятия, фрагментом которой служит разбитое густой сеткой раз-

рывных нарушений Плато Широкое. По [5], в основании разреза плато вскрывается сложно-построенная пачка вулканогенных и туфогенно-осадочных пород с видимой мощностью до 300 м, имеющая плиоцен-раннеплейстоценовый возраст. На ней по очень неровному эрозионному контакту залегают три толщи пирокластики, включая игнимбриты, кальдерообразующих извержений общей мощностью до 600 м [5, 6]. На месте уничтоженной части западной структуры располагаются крупные экструзивные массивы плато Круглое (1025 м) и г. Гейзерная (1086 м). Граница между западным и восточным резургентными поднятиями проходит по долине р. Гейзерная, заложеной по кольцевому разлому у восточного борта кальдеры Гейзерная (рис. 1а).

В настоящее время обе эти структуры и насыщенные на них вулканические образования прорезаны долиной р. Гейзерная в ее нижнем и среднем течении на глубину до 400–500 м.

Подобная вулcano-структурная приуроченность долины р. Гейзерная и ее большая глубина оказались главным благоприятным фактором для возникновения здесь знаменитой Камчатской Долины Гейзеров, а также оказали определяющее влияние на весь комплекс прошлых и современных геолого-геоморфологических процессов, в том числе, и самых катастрофических. Неглубоко залегающие магматические тела в пределах резургентных поднятий обеспечили резко повышенный уровень выноса тепла и интенсивный нагрев большого объема воды. Измеренная на протяжении многих лет исследований общая разгрузка термальных вод Гейзерной системы равна 250–300 л/с, а естественная тепловая мощность, определенная по величине разгрузки и глубинной температуре (250°C), достигает 320 МВт [7]. Обилие глинистых измененных пород, густая сетка разрывных нарушений, быстрый эрозионный глубинный врез р. Гейзерная, высокая сейсмичность района послужили причиной проявления исключительной по масштабам обвальной и обвально-оползневой деятельности на крутых и высоких бортах ее долины (рис. 1б). На протяжении последних 20–25 тыс. лет возникли десятки крупных оползней, обвалов с грубообломочными лавинами и аллохтонами. Самые свежие из них имеют современный возраст: связанный с тайфуном Эльза оползень случился в 1981 г. [13], а катастрофический обвал в бассейне руч. Водопадный (левый приток р. Гейзерная) – 3 июня 2007 г.

ИСТОРИЯ И МЕТОДИКА АЭРОФОТОГЕОДЕЗИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

Аэрофотогеодезические (аэрофотограмметрические) наблюдения за состоянием Долины Гейзеров, по инициативе В.М. Сугрובה, были начаты ИВ совместно с кафедрой фотограммет-

рии НИИ-ГАиК в 1973 г. Основной задачей первых лет сотрудничества являлось топографическое картографирование Долины. В августе–сентябре 1973 г. впервые была выполнена плано-высотная подготовка объекта под крупномасштабное топографическое картографирование (закрепление, определение координат и маркировка опознаков), а в конце сентября своими силами и средствами произведена аэрофотосъемка Долины Гейзеров с целью составления топографических планов и карт в масштабах 1 : 2000 и 1 : 10000. Составительские оригиналы двух топографических планов масштаба 1 : 2000 (на участок дна Долины Гейзеров от гейзера Первенец до гейзера Великан и всю зону распространения горячих источников вдоль русла руч. Водопадный) и листа карты масштаба 1 : 10000 (на полосу, шириной 2 км, дна Долины Гейзеров от места слияния рек Шумная, Гейзерная, Сестренка, практически до северной границы распространения Верхнегейзерных источников) были подготовлены к весне 1974 г. Перечисленный картографический материал был отпечатан в 300-х экземплярах на картографической фабрике № 3 (г. Хабаровск) и к концу 1975 г. передан Институту вулканологии.

После создания в ИВ в 1976 г. собственной группы Дистанционных исследований аэрофотосъемка отдельных участков Долины Гейзеров производилась эпизодически (29.09.1978, 26.06.1980 гг.), в надежде на то, что такой объект, с невероятно сложной геологической историей, богатой трещинной тектоникой и очень большими перепадами высот на ограниченной территории, рано или поздно себя проявит – в виде заметных деформаций поверхности.

Очередной всплеск интереса к дистанционным исследованиям Долины Гейзеров возник после тайфуна Эльза, бушевавшего над Долиной 4 октября 1981 года [13]. Целенаправленная съемка Долины – для регистрации последствий тайфуна – была выполнена 29 октября 1981 г. Материалы аэрофотосъемки подтвердили весьма слабую устойчивость склонов Долины Гейзеров и позволили выявить первый со времени начала наблюдений крупный оползень (рис. 2). Он сошел, скорее всего, во время тайфуна, с восточного склона Долины в районе гейзера Бурлящий (южный участок Верхнегейзерных источников). Фронтальная часть оползня достигла русла р. Гейзерная и стала поставщиком материала для грязекаменного потока (себя), пронесшегося по руслу реки и причинившего серьезный ущерб некоторым горячим источникам (Малахитовый грот и др.), расположенным в прирусловой зоне. Поэтому в последующие годы аэрофотосъемки отдельных участков Долины Гейзеров выполнялись чаще: 29.10.1981, 19.10.1982, 13.09.1985, 10.04.1986, 22.09.1986, 22.06.87 и 16.08.1993 гг.

Кроме того, оползень послужил толчком к тому, чтобы к весне 1982 г. руководством ИВ совместно с



Рис. 2. Оползень, сошедший с восточного склона Долины Гейзеров во время тайфуна Эльза 4 октября 1981 г. Стрелка – направление перемещения материала. Аэрофото В.Н. Двигало 29.10.1981 г.

руководителями Кроноцкого заповедника было принято решение о необходимости картографирования всей территории Долины Гейзеров в масштабе 1 : 10000 и о разработке технологии наблюдений за склоновыми процессами. Наблюдения предполагалось осуществлять силами ИВ и НИИГАиК, с которым в то время существовало постоянное научно-техническое сотрудничество.

Объединенный топографо-геодезический отряд ИВ и НИИГАиК начал работы по этому плану в июле 1982 г. Первоочередной задачей отряда являлось создание опорной геодезической сети с надежно закрепленными на местности точками. В дальнейшем предполагалось использовать эти точки в качестве исходных при изучении склоновых про-

цессов как дистанционными, так и геодезическими методами. Геодезические точки в основном закреплялись скальными марками, а там, где это было невозможно, грунтовыми реперами типа 2ГР. Определение координат точек, равномерно расположенных по бортам Долины, производилось построением сети микротриангуляции. Некоторые точки определялись прямыми, обратными или комбинированными засечками. Результаты этих работ подробно отражены в отчете НИИГАиК за 1982 г.

Вторая задача состояла в планово-высотной привязке материалов наиболее удачной (без малейших признаков облачности и паровых шлейфов от горячих источников, обычно сильно мешающих картографированию местности в подобных райо-

нах) аэросъемки, выполненной ИВ в 1978 г. В 1983–1985 гг., по материалам подготовленной в плано-высотном отношении аэросъемки 1978 г., НИИГАиКом была составлена и издана на картфабрике № 3 (г. Хабаровск) на двух листах новая топографическая карта масштаба 1 : 10000, охватывающая уже всю территорию Долины Гейзеров.

К большому сожалению, работы по наблюдению за опасными процессами и событиями в Долине Гейзеров не получили продолжения не только из-за отсутствия финансирования, но еще и потому, что в начале 1990-х годов XX в. Долина была полностью закрыта: запрещены посещения этого объекта для производства каких бы то ни было работ и полеты над ней с целью выполнения аэрофотосъемок. И лишь в 1993 г., благодаря аэросъемочным работам на вулканах Камчатки, выполняемым ИВ совместно с Министерством Обороны России, с борта самолета АН-30 были получены несколько стереопар Долины Гейзеров, совершенно случайно захвативших весь район схода и отложения обвало-оползня 2007 г. Эти стереопары, а также материалы аэрофотосъемки 12 июля 2007 г. и стали основой аэрофотограмметрических исследований последствий событий 3 июня 2007 г.

АЭРОФОТОСЪЕМКА 12 ИЮЛЯ 2007 г. КАК КЛЮЧ К ПОНИМАНИЮ И ОБЪЕКТИВНОЙ ОЦЕНКЕ ПОСЛЕДСТВИЙ КАТАСТРОФИЧЕСКОГО СОБЫТИЯ 3 ИЮНЯ 2007 г.

Задержка с проведением аэрофотосъемки последствий событий 3 июня 2007 г. связана с тем, что почти полтора месяца потребовалось для того, чтобы найти возможность вылететь в район Долины Гейзеров. Обычный серийный вертолет Ми-8, принадлежащий МЧС, был оснащен топографическим аэрофотоаппаратом АФА-ТЭ140. Долина Гейзеров 12 июля 2007 г. была полностью свободна от облачности, и только сильный ветер усложнял работу пилотам во время полета по заранее намеченным на карте маршрутам.

Аэрофотосъемка выполнялась с трех уровней. Самый мелкий масштаб определялся способностью вертолета Ми-8 подняться на максимально возможную высоту – 4200 м над уровнем моря. Над средним уровнем рельефа Долины наибольшая высота полета составила около 3400 м. При съемке камерой с фокусом 140 мм эта высота фотографирования обеспечивала средний масштаб снимков 1 : 24000 и захват полосы местности одним маршрутом, шириной не менее 4300 м. Следовательно, одним съемочным маршрутом, проложенным на этой высоте, охватывалась вся территория, оказавшаяся в зоне обвало-оползневых процессов. Материалы мелкомасштабной аэросъемки от 12.07.2007 г., совместно с материалами аэрофотосъемки 1993 г., использовались для количественных оценок послед-

ствий событий 3 июня – определения площадей и объемов и картографирования отложений оползневых масс, построения топографических профилей. Для детального изучения и картографирования поверхности отрыва пород и отложений обвало-оползня маршрутная аэрофотосъемка выполнена еще в двух масштабах с высот 2500 (рис. 3) и 1300 м. Полученные материалы обеспечили возможность самого подробного исследования поверхности перемещенных пород и прилегающих территорий.

ПОДГОТОВКА ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ВНЕШНЕГО ОРИЕНТИРОВАНИЯ СТЕРЕОМОДЕЛЕЙ И ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЕ СГУЩЕНИЕ СЕТИ ОПОРНЫХ ТОЧЕК

Технология построения по аэрофотоснимкам ориентированных объемных стереомоделей местности, позволяющих выполнять измерения с точностью, не превышающей установленные для каждого масштаба съемки допуски, предполагает обязательную геодезическую подготовку изучаемого объекта. При этом широко используются два основных варианта.

Первый (наиболее предпочтительный) выполняется перед аэрофотосъемкой, именуется плано-высотной подготовкой объекта и обеспечивает наивысшую точность построения, ориентирования и измерения стереомоделей. Этот метод подразумевает закрепление на местности в определенных заранее зонах точек, называемых опознаками. Включает работы по определению координат центров опознаков высокоточными геодезическими приборами и их последующую маркировку такими материалами, которые обеспечат уверенное и точное распознавание и измерение координат центров опознаков по снимкам.

Второй, называемый плано-высотной привязкой снимков, применяется обычно в случаях, когда аэрофотосъемка объекта исследований уже выполнена. Тогда в качестве опознаков используются объекты и предметы местности, однозначно распознаваемые на снимках. Определение координат характерных точек таких объектов (центров естественных опознаков, которыми могут быть углы сооружений, точки пересечений тропинок, центры крупных камней и т.п.) производится теми же методами и инструментами, что и в первом варианте.

Оба названных варианта подразумевают обязательное производство на объекте дорогостоящих геодезических работ и поэтому оказались невозможными, по причине полного отсутствия денежных средств в летне-осенний сезон 2007 г.

Только поэтому для плано-высотной подготовки полученных аэрофотоснимков был выбран третий, наименее точный, но и самый малоза-

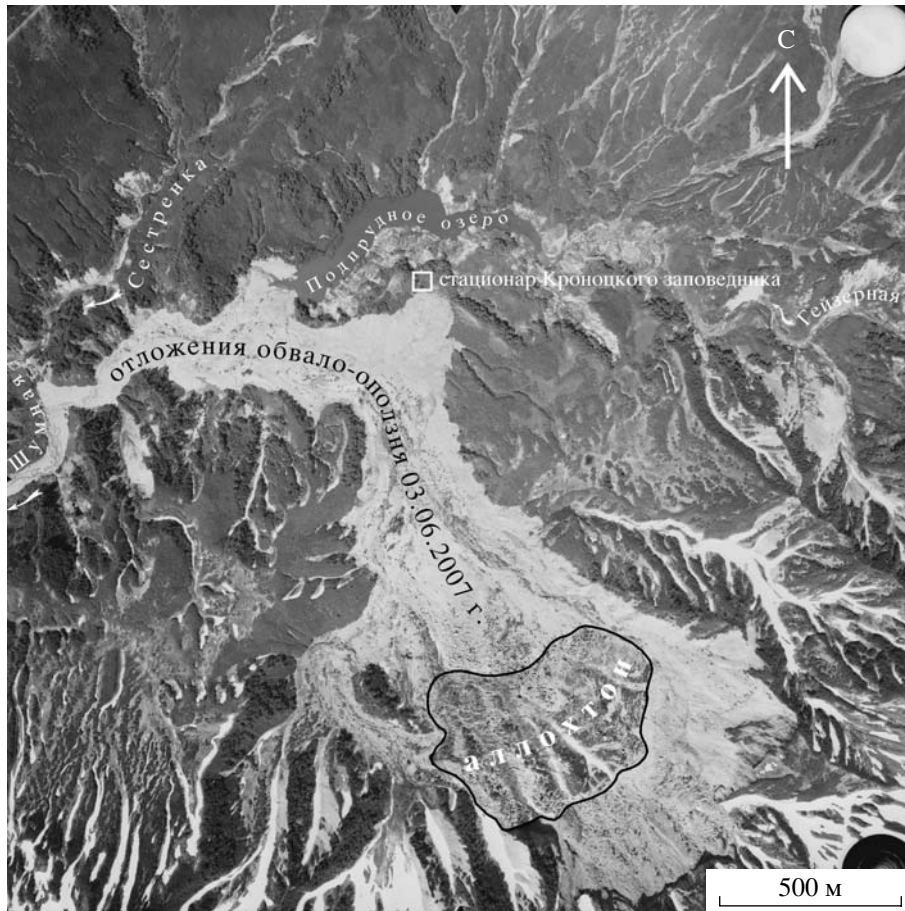


Рис. 3. Зона обрушений склона, аллохтон, рыхлые отложения обвало-оползня и подпрудное озеро в Долине Гейзеров. Аэрофото В.Н. Двигало 12.07.2007 г.

тратный вариант, основанный полностью на камеральной привязке снимков с использованием характерных точек рельефа и ситуации имеющих топографических карт. Точность третьего варианта целиком зависит от точности используемых топографических карт и планов. Большое значение имеет детальность отображения ситуационной нагрузки на этих картах, позволяющая находить и опознавать на снимках точки привязки в необходимых местах.

Кроме перечисленных выше картографических материалов, полученных благодаря НИИГАиК, в нашем распоряжении была еще Государственная топографическая карта района, масштаба 1 : 25000, изданная по материалам аэросъемочного залета 1968 г. Все карты обладали тремя главными недостатками: были сильно устаревшими, имели недостаточную точность и низкую подробность отображения четких контуров. Так как других вариантов подготовки снимков не существовало, нам все-таки удалось, с очень большими моральными и временными потерями, подобрать по картам сеть опорных точек с подписанными высотными отметками и выполнить их фотограмметри-

ческое сгущение по аэроснимкам самого мелкого масштаба. После многочисленных процедур уравнивания сети фототриангуляции все обрабатываемые стереопары были обеспечены опорными точками, позволяющими строить по снимкам стереомодели Долины Гейзеров и ориентировать их в пространстве необходимым образом.

Результаты фототриангуляции по маршруту снимков масштаба 1 : 24000 соответствовали всем требованиям по точности абсолютного ориентирования, точности отображения контуров и ситуации, в масштабах, начиная от 1 : 10000 и мельче (т.е. 1 : 25000, 1 : 50000 и др.), с сечением рельефа от 5 м и более. И это вполне объяснимо, так как исходными картами для получения опорных точек служили в основном карты масштаба 1 : 10000.

СОЗДАНИЕ СТЕРЕОМОДЕЛЕЙ ДОЛИНЫ ГЕЙЗЕРОВ, ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ И КАЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕЛ ОБРУШЕНИЯ

Пространственное фототриангулирование по маршруту мелкомасштабных снимков позволило



Рис. 4. Структуры обрушения в верховьях долины руч. Водопадный: 1 – часть склона Долины Гейзеров – источник основного объема отложений обвало-оползня; 2 – участок стенки Долины Гейзеров, в результате сползания которого возник аллохтон. Стрелки – направление перемещения блоков. Аэрофото В.Н. Двигаало 16.08.1993 г.

построить объемную ориентированную модель, состоящую из пяти стереопар съемки 12.07.2007 г., покрывающих всю территорию Долины Гейзеров. Этот ориентированный маршрут снимков стал использоваться в качестве базового для привязки стереопар всех других аэрофотосъемок Долины, выполненных как 12.07.2007 г., так и ранее. В качестве опорных и контрольных точек для внешнего ориентирования всех стереопар использовались четкие контурные точки, вершины скал, крупных камней, хорошо распознаваемые на снимках исходного маршрута и привязываемых стереопарах.

Изучение поверхности, подстилающей отложения оползня, производилось по стереомодели, построенной с использованием снимков 23.08.1993 г. Было установлено, что главными элементами произошедшей природной катастрофы 3 июня 2007 г. были два геологических тела, которые и определили, в сущности, ее общий геолого-геоморфологический эффект.

Тело № 1 (рис. 4) было представлено фрагментами хребтов верховий руч. Водопадный. Объем тела между высотами 740 и 580 м определялся по площадям замкнутых сечений (образованных горизонталями до и после обрушений) при высоте сечений в 20 м. На участке от 580 до 500 м поверхность отрыва пород оказалась перекрытой отло-

жениями оползня. Поэтому мы смогли получить здесь точные контуры сечений тела только на время до рассматриваемых событий, т.е. до обрушений. Поскольку в нижней части это тело выклинивалось в довольно узкую структуру, со средней шириной основания около 200 м., то это позволило, как нам представляется, без больших погрешностей, домыслить и смоделировать поверхность отрыва пород, достроить необходимые сечения и вычислить их площади, а затем и объем всего тела до обрушения – 12238000 м³.

Материал разрушенного тела № 1 послужил основой для образования, мощного (до 70 м) комплекса грубообломочных отложений. В его основании залегают отложения селя. Они перекрыты несколькими порциями пород грубообломочных обвалных лавин. На их долю приходится основной объем тела № 1. В составе отложений присутствует также материал, попавший туда в результате интенсивной абразии бортов долины руч. Водопадный при прохождении лавин. Самая верхняя порция – материал небольших гравитационных обвалов и оползней заключительной стадии обрушений и последующих дней (до 12 июля 2007 г.) с высоких и крутых стенок обвалных цирков.

Тело № 2 определено И.В. Мелекесцевым как прекрасно выраженный в рельефе крупный аллох-

тон, сползший на заключительной стадии обрушений (рис. 3). Его объем рассчитывался с использованием данных цифрового моделирования рельефа стенки на две даты. Первая построена по ориентированной стереопаре аэроснимков от 23.08.1993 г. Вторая – по аэроснимкам 12.07.2007 г., т.е. после обрушений. Причем поверхность отрыва пород в данном случае была полностью открыта, что и обеспечило высокую точность определений. Объем аллохтона равен 4762000 м³. Аллохтон переместился по горизонтали на 337 м, по высоте – на 126 м и, упершись в отложения и крупные фрагменты тела № 1, остановился. Площадь его поверхности 222400 м². Средняя мощность пород аллохтона – 22 м, максимальная – 34 м. Небольшие скорость, вертикальная и горизонтальная амплитуды перемещения аллохтона обеспечили почти полную сохранность его первичной поверхности. Произошло лишь его незначительное дробление. Морфология аллохтона практически не нарушилась: сохранились все гребни и впадины на его поверхности, остались без изменения снежники на дне впадин и даже кустарник, росший на нем.

Общий объем обрушенных пород во время катастрофы составил 17 млн. м³ (12238000 м³ + 4762000 м³), а площадь их распространения достигла почти 1 км² (994096 м²). Поскольку часть обрушенного материала была раздроблена и разуплотнена, то суммарный объем перемещенного материала, вычисленный по результатам цифрового моделирования поверхностей на 23.08.1993 г. и 12.07.2007 г., оказался несколько больше объема обрушенных пород – около 21 млн. м³ (20752000 м³). Последний также включает объем (759000 м³) пород обвало-оползня, оказавшихся под водой подпрудного озера в долине р. Гейзерная, который получен с использованием цифровой модели поверхности дна долины р. Гейзерная на участок от гейзера Скалистый до гейзера Малый, построенной по снимкам 1993 г. и данных промеров глубин озера, предоставленных В.А. Дрозниным.

Необходимо отметить, что 3 июня 2007 г., сразу после схода обвало-оползня, объем его отложений был больше на 305000 м³. Именно такое количество пород было вынесено в р. Шумная к дате аэрофотосъемки (12.07.2007 г.) после прорыва плотины, приведшей к возникновению подпрудного озера и формированию на этом участке нового русла р. Гейзерная.

Следует остановиться на нескольких интересных моментах, связанных с аллохтоном 3 июня 2007 г.

Прежде всего, надо отметить, что он оказался первым и пока единственным на Камчатке из подобных форм, зафиксированных в современную эпоху. Хотя сотни таких же и еще более крупных (вплоть до гигантских – объемом 1–10 км³) аллохтонов были выявлены и закартированы на полу-

острове [4, 9 и др.] раньше, в том числе, и в бассейне р. Гейзерная (рис. 1б).

Очень интересно и то, что описанный аллохтон и само обрушение 3 июня произошли при отсутствии сколько-нибудь заметной тектонической и сейсмической активности как в бассейне р. Гейзерная, так и на сопредельных участках. Обычно же считается [12 и др.], что большеобъемные обрушения и аллохтоны – индикаторы сильных землетрясений или резких тектонических подвижек.

В рассмотренном случае непосредственная причина возникновения аллохтона – образование высокой субвертикальной стенки, а небольшие вертикальная и горизонтальная амплитуды его перемещения объясняются возникшей “плотиной” из пород разрушенного тела № 1. Она стала препятствием для дальнейшего продвижения и дезинтеграции тела № 2. Для самого же обрушения 3 июня 2007 г. предлагается комплекс причин [11]. Так, наиболее вероятной причиной обрушения, скорее всего, является длительное ослабление склонов, сложенных здесь исключительно в разной степени уплотненными и слабо сцементированными вулканогенно-осадочными породами гейзерной свиты. Этому способствовали и другие особенности строения гейзерной свиты: преимущественно пемзовый состав отложений, локализация в толще свиты отмерших и действующих термопроявлений с характерными для них глинистыми гидротермально измененными породами в виде своего рода смазки, ориентированное по падению склонов наклонное залегание чередующихся водоупорных слоев и водоносных горизонтов. Весьма благоприятными для обрушения были также геоморфологический (крутые, до вертикальных, склоны) и тектонический (наличие на склонах разрывных нарушений и зияющих трещин отрыва) факторы. Способствовали обрушению и интенсивно протекавшие на склонах мерзлотные процессы.

Ослабление склонов началось задолго до обрушения. При просмотре стереомоделей, построенных по аэроснимкам 1970-х годов XX в., в тыловой части будущего обвального цирка совершенно четко распознается совпадающая с верхней границей стенки отрыва хорошо выраженная зияющая трещина.

Наконец, можно определенно утверждать, что описанный аллохтон буквально спас Долину Гейзеров от полного уничтожения. Если бы почти 5 млн. м³ его пород не сползли в виде единого блока-аллохтона, а обрушились бы и быстро скатились по выровненной предшествующими обвальными лавинами поверхности, то последствия для наиболее посещаемой части Долины Гейзеров оказались бы более катастрофическими.

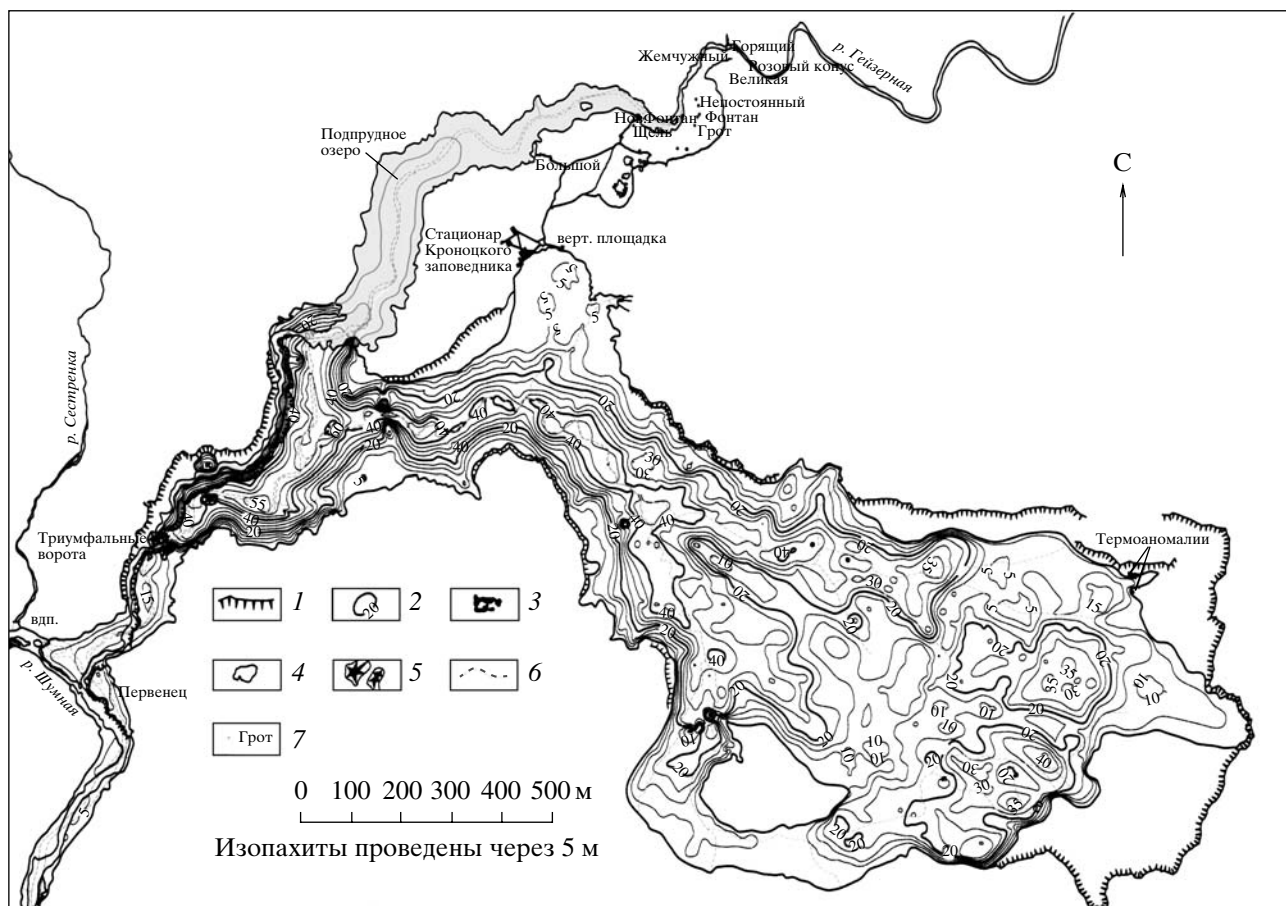


Рис. 5. Карта мощностей отложений (в м) обвало-оползня; подпрудное озеро и положение нового русла р. Гейзерная на дату аэрофотосъемки 12.07.2007 г. Изопахиты проведены через 5 м. 1 – линия отрыва пород обвало-оползня; 2 – линии равных толщин отложений оползня (изопахиты). Цифры обозначают толщину отложений в м; 3 – термальные площадки, возникшие после схода оползня; 4 – озера; 5 – скалы останцы, частично или полностью погребенные оползнем; 6 – русла водотоков перекрытые породами оползня и подпрудным озером; 7 – сохранившиеся гейзеры центральной части Долины.

СОСТАВЛЕНИЕ КАРТЫ МОЩНОСТЕЙ ПЕРЕМЕЩЕННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

Составление карты мощностей было продиктовано необходимостью изучения характера распределения перемещенных отложений, определения реальной их мощности на конкретных участках Долины, в частности – над погребенными гейзерами и термальными источниками. Необходима эта карта также для дальнейшего наблюдения за процессами восстановления водотоков Долины Гейзеров и ее постепенного освобождения от пород оползня.

Построение карты осуществлялось по результатам координирования поверхности рельефа Долины с использованием стереомоделей на 12.07.2007 г. и 23.08.1993 г. При этом обязательно определялись координаты и высоты характерных точек контура и рельефа (основных перегибов как по контуру, так и по рельефу). Всего на площади

994000 м² определена 2521 точка – т.е., примерно по 1 точке на квадрат размером 20 × 20 м. В результате выполненных измерений и вычислений получен файл мощностей отложений в характерных точках с известными координатами. Интерполяция изопахит (линий равных мощностей отложений) произведена через 5 м. Полученная карта мощностей перемещенных отложений представлена в двух вариантах на рис. 5 и 6: по состоянию на 12.07.2007 г. и 07.06.2007 г.

Кроме информации о мощности отложений, на карте приведена топографическая ситуация, в основном, гидрографическая сеть: русла рек Гейзерная, Сестренка, Шумная, полностью перекрытого отложениями руч. Водопадный и его притоков, вновь возникшее озеро. Зубчатой линией даны границы обрушений склонов Долины Гейзеров, связанных с образованием обвало-оползня. Пока-

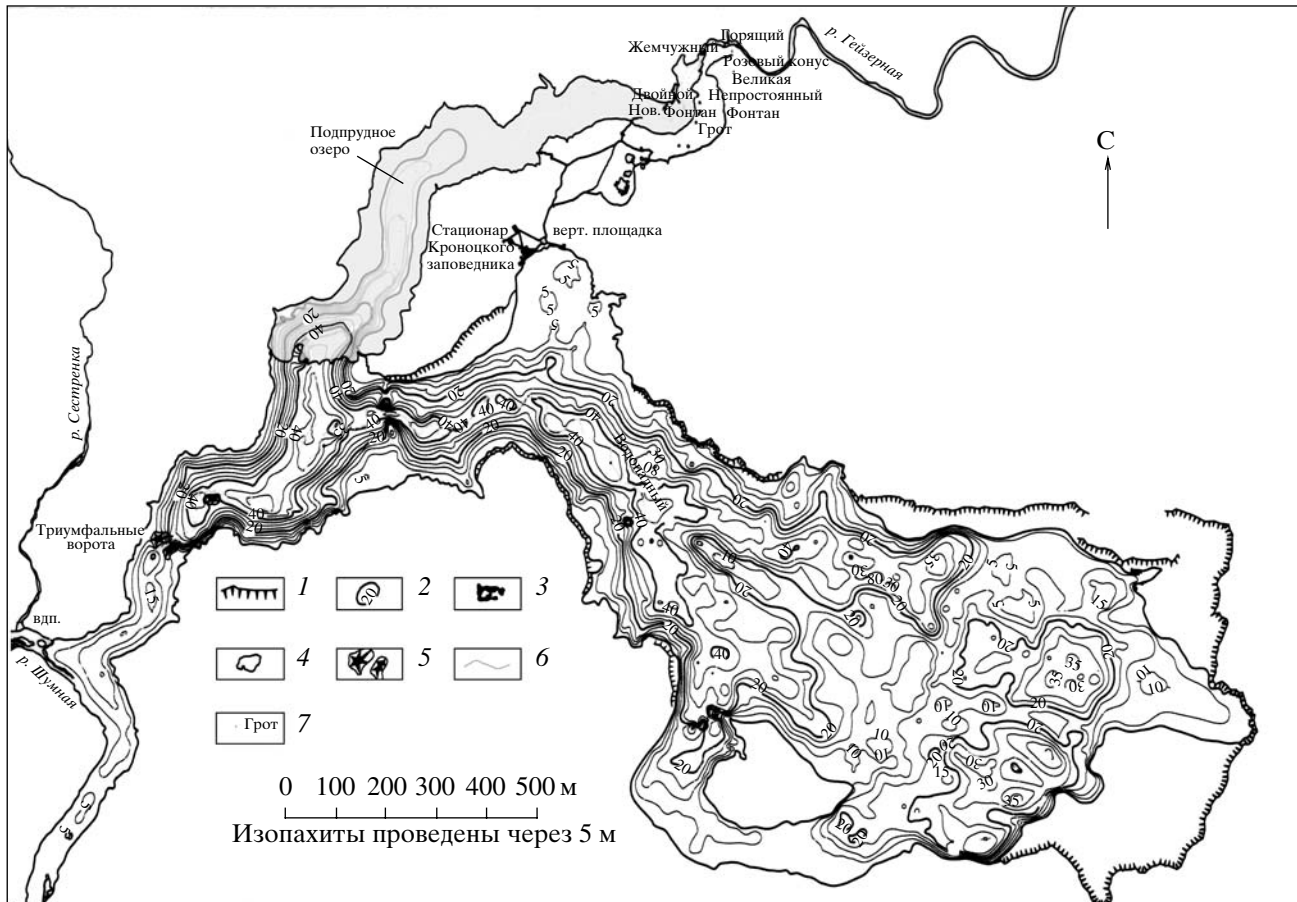


Рис. 6. Реконструированная карта мощностей в м отложений обвало-оползня, отображающая его состояние и размеры перед прорывом подпрудного озера 07.06.2007 г. Изопахиты проведены через 5 м. Услов. обозн. те же, что и на рис. 5.

зано также расположение сохранившихся хозяйственных построек Кроноцкого заповедника.

Несмотря на то, что для построения карты использовались снимки, полученные 12.07.2007 г., а к этому времени уже было образовано новое русло р. Гейзерная с каньоном, объемом 305000 м³, нами была реконструирована кровля обвало-оползневой толщи, на участке русла р. Гейзерная, соответствующая дате 07.06.2007 г. (рис. 6). Именно в этот день уровень подпрудного озера достиг своего максимального значения – 434 м над уровнем моря. Затем произошел размыв плотины, и сформировалось новое русло р. Гейзерная. Восстановить состояние обвало-оползня на момент его остановки позволило сохранившееся четкое изображение границы контакта его пород (на снимках 12.07.2007 г.) с правым склоном борта долины р. Гейзерная. Количественные характеристики обвало-оползня и подпрудного озера, полученные на обе даты при составлении карт мощностей отложений приведены в табл.

ПОТЕНЦИАЛЬНО ВОЗМОЖНЫЕ ОПАСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ДОЛИНЕ ГЕЙЗЕРОВ

Изучение объемных изображений Долины Гейзеров не вызывает сомнений в том, что такие опасные процессы, как обвалы горных пород, крупные и мелкие оползни, грязевые потоки, связанные с образованием и прорывом озер или с метеорологическими катаклизмами, происходили в этом районе на протяжении всего времени формирования Долины. Причем интенсивно разрушались оба борта долины р. Гейзерная. Все изображенные на рис. 1б оползни возникли в течение позднего плейстоцена-голоцена (последние 25–20 тыс. лет), а наиболее молодые – за последние сотни лет. Объемы закартированных в нижнем течении р. Гейзерная позднеплейстоцен-голоценовых аллохтонов составляют от 0.04 до 0.08 км³, десятков крупных обвало-оползней – 0.001–0.020 км³, оползней – десятки тыс. м³.

Количественные характеристики отложений обвало-оползня и подпрудного озера

Параметр	07.06.2007 г.	12.07.2007 г.
Площадь отложений обвало-оползня (м ²)	994096	979890
Общий объем отложений обвало-оползня (м ³)	21057000	20752000
Средняя мощность отложений (м)	21.2	21.2
Наибольшая мощность отложений обвало-оползня (м)	70.9	70.9
Объем материала оползня, вынесенного в р. Шумная к 12.07.2007 г. после прорыва плотины подпрудного озера и образования нового русла р. Гейзерная (м ³)		305000
Размеры озера:	протяженность (м)	950
	наибольшая ширина (м)	122
	максимальная глубина (м)	27
	площадь зеркала озера (м ²)	124604

Современная морфология Долины Гейзеров – невероятная раздробленность ее склонов (расчлененных многочисленными разломами и трещинами), представленных мелкими и крупными блоковыми структурами, очень большая (до отвесных) крутизна склонов, имеющих перепады высот полкилометра и более, состав пород, слагающих склоны, высокая обводненность района, наличие мощных гидротермальных процессов и очень высокая сейсмичность территории – не оставляют никаких надежд на то, что эти опасные процессы прекра-

тятся. Иллюстрацией вполне подготовленного обвала участка склона Долины Гейзеров в районе оползня 1981 г. может быть рис. 7, в верхней части которого четко видны две зияющие глубокие трещины, основательно подрезавшие часть борта Долины. Не меньшую опасность представляют фрагменты стенки Долины, расположенные над обвальным цирком, возникшим 3 июня 2007 г. Они также уже отсечены трещинами от массива южного борта Долины и вполне могут обрушиться во время ближайшего сильного сейсмического события. Вполне

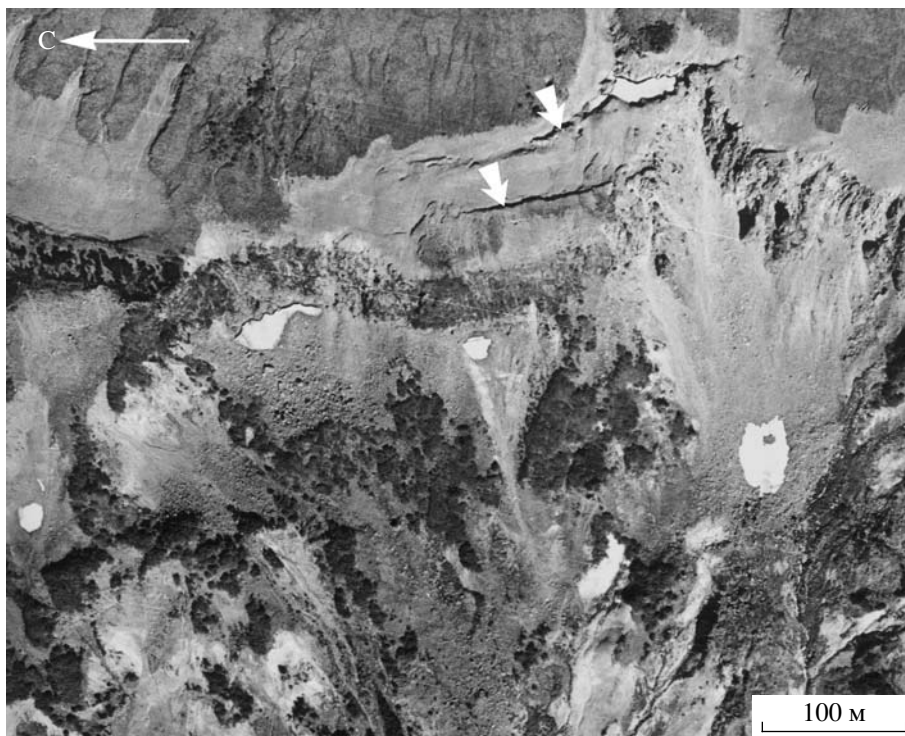


Рис. 7. Участок восточного борта Долины Гейзеров, подготовленный к обрушению. Стрелками показаны свежие разрывные нарушения. Аэрофото В.Н. Двига́ло.

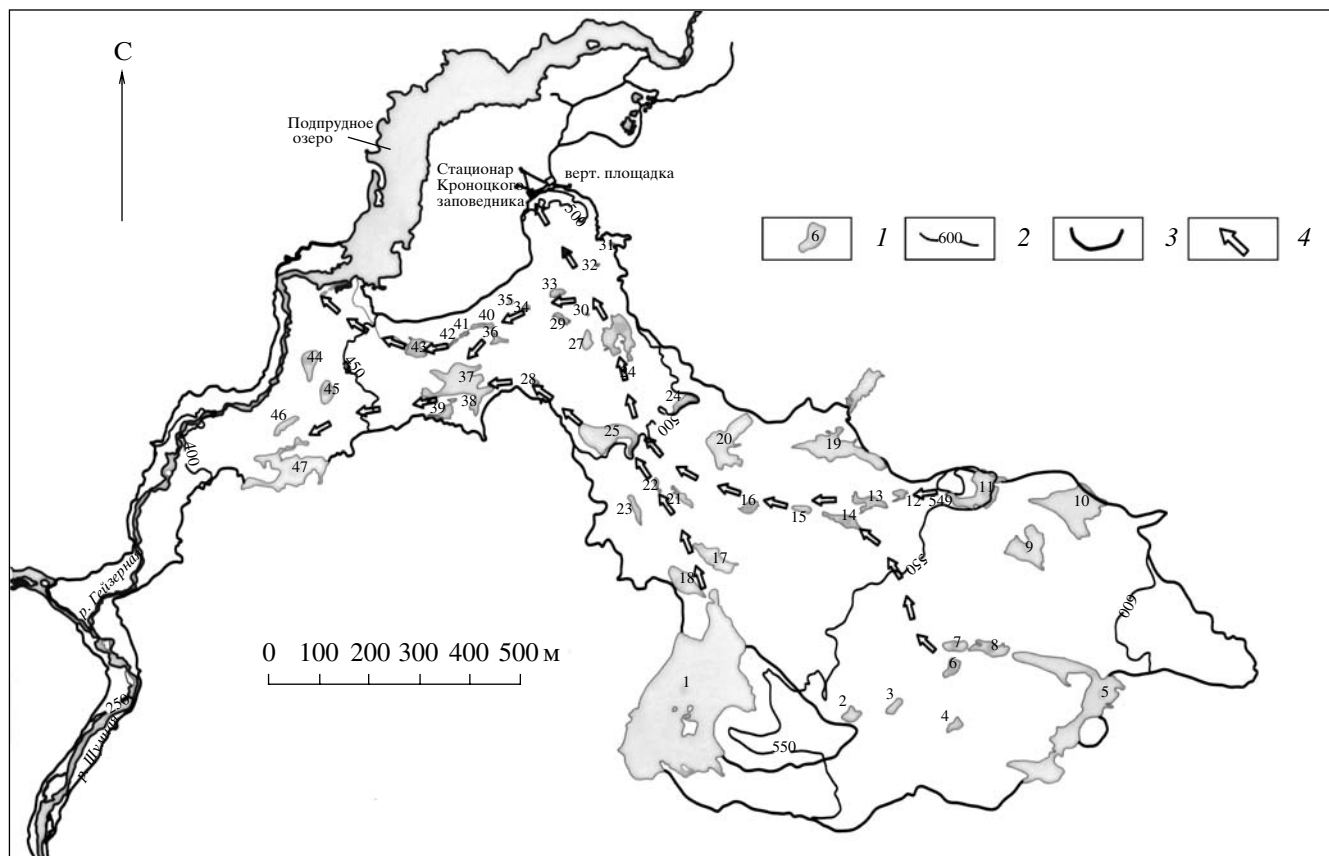


Рис. 8. Предполагаемое расположение и вероятные размеры наиболее крупных озер, возникновение которых возможно на поверхности оползня к лету 2008 г. Горизонтالي проведены через 50 м. 1 – озера, возникновение которых возможно в понижениях рельефа на поверхности оползня к лету 2008 г.; 2 – горизонтали с подписанными отметками; 3 – контур отложений обвало-оползня; 4 – направления движения возможных грязевых и руслообразующих водных потоков.

подготовлены к обрушению и разрушению очень крупные блоки пород (от 0.2 до 0.7 км³), слагающие южный и юго-восточные склоны экструзивного массива г. Гейзерная (1086 м).

Причем таких и других, не менее потенциально опасных событий и явлений в Долине гейзеров, предостаточно.

Первое, что сразу привлекло наше внимание при изучении ориентированной стереомодели обвало-оползня 2007 г. – наличие на поверхности перемещенных отложений большого количества разных по размеру углублений (котлованов). Часть их возникла непосредственно в ходе перемещения материала, часть – при последующих просадках его поверхности, вызванных таянием захваченных мерзлых пород и снега, а также подстиляющего снежного покрова, и уплотнением самого материала. Многие из этих котлованов ко времени аэрофотосъемки 12.07.2007 г. в разной степени уже были заполнены водой.

Нет полной уверенности в том, что все существующие на поверхности оползня котлованы, рано или поздно, будут заполнены водой, но структу-

ра и состав его отложений, содержащих много водоупорных глинистых пород, скорее всего, будут способствовать этому процессу. В таком случае, уже к лету 2008 г. можно получить совсем иную картину поверхности обвало-оползня, которая по нашим представлениям, основанным на результатах измерения стереомодели, будет выглядеть так, как показано на рис. 8. Количество озер и их размеры должны существенно возрасти. Суммарный объем воды в наиболее крупных озерах верхней половины обвало-оползня (№№ 1, 5, 9, 10, 11, 19, 20 и 25) может достигнуть к лету 2008 г. 400 тыс. м³. Такой объем воды в верхней части обвало-оползневых отложений – первая предпосылка и одновременно составная часть вполне возможной будущей катастрофы.

Вторая часть – дополнительное обрушение пород со стенки обвального цирка. Дело в том, что обрушение материала, слагавшего склоны и верховья долины бывшего руч. Водопадный, происходило последовательно, причем последняя крупная порция, представляющая собственно фрагмент стенки обвального цирка, плавно съехала со свое-

го места в виде аллохтона и целиком легла у подножия стенки, сохранив основные черты прежней морфологии и растительный покров. Но выше места отрыва аллохтона остались довольно крупные блоки пород, буквально нависающие (ничем не подпертые снизу) над описанными котлованами, которые, возможно, после схода снега будут целиком заполнены водой. Обрушение более или менее крупного нависающего участка склона в один или несколько водоемов приведет к резкому выбросу из них воды на поверхность обвало-оползня, уже основательно к тому времени “заряженного” другими многочисленными водоемами, и возникновению мощного селя.

Еще один спусковой механизм для возникновения крупного грязевого потока можно представить в следующем виде. Самый крупный котлован № 1 (который уже наиболее быстро заполнялся водой летом 2007 г.) к лету 2008 г. может иметь максимально возможный объем воды в 250 тыс. м³. От поверхности обвало-оползня его отделяет узкая перемычка (20 м), сложенная рыхлым материалом бортового вала обломочной лавины. Эта перемычка при переполнении котлована будет интенсивно размываться. Если процесс размыва произойдет очень быстро, большие массы воды так же быстро приведут к образованию селя.

В качестве примера, позволяющего представить последствия подобных явлений, можно привести случай, произошедший с озером Снежное, зафиксированный нами аэрофотосъемкой в 1989 г. на склоне вулкана Эбеко (о. Парамушир на Северных Курилах) и подробно описанный в работе [10]. Здесь же отметим лишь то, что выброс воды из озера Снежное, площадью всего 440 м² и содержавшего не более 2000 м³ воды (это в 125 раз меньше, чем будет накоплено в котловане № 1!), привел к образованию разветвленного грязевого потока, протяженностью почти 1.5 км и шириной до 60 м.

Понятно, что предотвратить развитие или ослабить влияние многих опасных процессов в Долине Гейзеров, скорее всего, невозможно. Но попытаться предугадать или даже спрогнозировать места, а, возможно, и время таких событий, при современном уровне развития техники и технологий наблюдений за опасными событиями и процессами – вполне реально. Для этого необходимо организовать здесь постоянный комплексный (прежде всего геодезический и аэрофотограмметрический) мониторинг предварительно выявленных участков, где подобные потенциально опасные события и процессы наиболее вероятны.

Авторы выражают благодарность сотрудникам Лаборатории геодезии и дистанционных методов исследований ИВиС В.А. Дрознину, И.Ю. Свириду и А.В. Шевченко за помощь в организации аэрофотосъемочных работ и подготовке данных для фотограмметрической обработки аэроснимков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Брайцева О.А., Богоявленская Г.Е., Эрлих Э.Н.* Геологическое строение Узонско-Гейзерной депрессии // Вулканизм, гидротермальный процесс и рудообразование. М.: Недра, 1974. С. 10–32.
2. *Брайцева О.А., Флоренский И.В., Вольнец О.Н.* Вулкан Кихпинич // Действующие вулканы Камчатки. Т. 2. М.: Наука, 1991. С. 74–93.
3. *Влодавец В.И., Пийп Б.И.* Каталог действующих вулканов Камчатки // Бюл. вулканол. станций. 1956. № 25. С. 5–95.
4. Камчатка, Курильские и Командорские острова / Под. ред. И.В. Лучицкого. М.: Наука, 1974. 440 с.
5. *Леонов В.Л.* Геологическое строение каньона р. Шумной и Узонско-Гейзерная депрессия Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1982. № 2. С. 100–104.
6. *Леонов В.Л., Гриб Е.Н.* Кальдеры и игнимбриты Узон-Семячинского района, Камчатка: новые данные по результатам изучения разрезов плато Широкое // Вулканология и сейсмология. 1998. № 3. С. 41–59.
7. *Леонов В.Л., Гриб Е.Н., Карпов Г.А. и др.* Кальдера Узон и Долина Гейзеров // Действующие вулканы Камчатки. Т. 2. М.: Наука, 1991. С. 94–141.
8. *Масуренков Ю.П.* Структурная позиция Карымского вулканического центра // Вулканический центр: строение, динамика, вещество. М.: Наука, 1980. С. 111–116.
9. *Мелекесцев И.В.* О сейсмостектонических обвалах и оползнях на Камчатке // Вопросы географии Камчатки. Вып. 3. Петропавловск-камчатский, 1965. С. 107–108.
10. *Мелекесцев И.В., Двигаало В.Н., Кирьянов В.Ю. и др.* Вулкан Эбеко (Курильские острова): история эруптивной активности и будущая вулканическая опасность. Ч. II. // Вулканология и сейсмология. 1993. № 4. С. 24–42.
11. *Пинегина Т.К., Делемень И.Ф., Дрознин В.А. и др.* Камчатская Долина Гейзеров после катастрофы 3 июня 2007 г. // Вестник ДВО РАН. 2008. № 1. С. 33–44.
12. Сейсмостектоника и сейсмичность рифтовой системы Прибайкалья. М.: Наука, 1968. 211 с.
13. *Сугрובה Н.Г., Сугрбов В.М.* Изменения режима термопроявлений Долины Гейзеров под влиянием циклона Эльза // Вопросы географии Камчатки. Вып. 9. Петропавловск-Камчатский, 1985. С. 88–94.
14. *Флоренский И.В.* К вопросу о возрасте кальдер Узон и Крашенинникова // Вулканология и сейсмология. 1984. № 1. С. 102–106.

The Geological and Geomorphic Impact of Catastrophic Landslides in the Geyser Valley, Kamchatka: Air-Borne Photogrammetry

V. N. Dvigalo, I. V. Melekestev

*Institute of Volcanology and Seismology, Far East Division, Russian Academy of Sciences,
Petropavlovsk-Kamchatskii, 683006, Russia*

We consider the results of the 1973–2008 air-borne photogeodetic surveys conducted in the famous Geyser Valley, Kamchatka by the Institute of Volcanology (IV) of the Far East Division (FED), Russian Academy of Sciences (RAS) in 1973–1993 and by its successor, the Institute of Volcanology and Seismology (IV&S) FED RAS in 2007–2008 in cooperation with the Chair of Photogrammetry of the Novosibirsk Institute of Geodetic, Aerophotosurvey and Cartographic Engineers (NIGACE) in 1973–1985. The air-borne survey performed by the IV following the Elsa typhoon in October 1981 helped identify and record the typhoon-induced landslide that was the first to occur during the observation period in the east side of the valley. The measured area of landslide deposits is 28600 m² and its volume is 80000 m³. An analysis of materials resulting from the July 12, 2007 aerophotosurvey was the basis for an objective evaluation of the impact of the June 3, 2007 catastrophic event in the Geyser Valley, for determining the qualitative and quantitative characteristics of the new forms, and for a long-term forecast of future hazardous events and processes. It was concluded that the hazardous natural events and processes that have occurred in the past will undoubtedly be occurring in the future as well. For this reason the Geyser Valley should be constantly monitored using highly accurate geodetic and remote sensing techniques.